

大容量全控型压接式 IGBT 和 IGCT 器件对比分析： 原理、结构、特性和应用

周文鹏, 曾嵘*, 赵彪, 陈政宇, 刘佳鹏, 白睿航, 吴锦鹏, 余占清

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

Comparative Analysis of Large-capacity Fully-controlled Press-pack IGBT and IGCT: Principle, Structure, Characteristics and Application

ZHOU Wenpeng, ZENG Rong*, ZHAO Biao, CHEN Zhengyu, LIU Jiapeng,

BAI Ruihang, WU Jinpeng, YU Zhanqing

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Fully-controlled press-pack devices are the core components of large-capacity power electronic equipment for power conversion, mainly including thyristor-like devices such as integrated gate commutated thyristor (IGCT), and transistor-like devices such as insulated gate bipolar transistor (IGBT) and injection enhanced gate transistor (IEGT). This paper firstly introduced and compared chip structures and manufacturing processes of IGCT and IGBT (including IEGT). Then, the working principles and packaging structures of IGCT and IGBT (including IEGT) were analyzed and compared. After that, the working characteristics of different fully-controlled press-pack devices were analyzed systematically from nine aspects including working frequency, turn-off capability, dynamic tolerance, device capacity, operating loss, gate driver power, housing package explosion proof, short circuit failure mode (SCFM), and device reliability. Finally, the application status and application forecast of fully-controlled press-pack devices were summarized and prospected.

KEY WORDS: press-pack device; insulated gate bipolar transistor (IGBT); injection enhanced gate transistor (IEGT); integrated gate commutated thyristor (IGCT); DC power grids; large-capacity power electronics

摘要: 全控型压接式器件是大容量电力电子装备实现功率转换的核心, 主要包括以集成门极换流晶闸管(integrated gate commutated thyristor, IGCT)为代表的晶闸管类器件和以绝缘栅型双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)、

注入增强栅极晶体管(injection enhanced gate transistor, IEGT)为代表的晶体管类器件。文中首先介绍并比较 IGCT 与 IGBT(含 IEGT)的芯片结构及制作工艺, 然后分析对比 IGCT 与 IGBT(含 IEGT)的工作原理及封装形式。接着从工作频率、关断能力、动态耐受、器件容量、工作损耗、驱动功率、管壳防爆特性、失效短路特性、器件可靠性等 9 个角度出发, 系统性分析不同全控型压接式器件的工作特性, 最后对其应用现状及前景进行概述及展望。

关键词: 压接式器件; 绝缘栅型双极晶体管; 注入增强栅极晶体管; 集成门极换流晶闸管; 直流电网; 大容量电力电子

0 引言

近年来, 随着可再生能源的大规模发展和并网运行需求的增加, 直流电网技术^[1-3]得到了快速发展和应用。基于电力电子技术的模块化多电平换流器^[4]、直流断路器^[5-6]和直流变压器^[7]等是构建直流电网的关键装备。而大容量半导体器件则是构建这些关键装备的最核心部件之一, 低成本、低损耗、高可靠的大容量半导体器件对于提升直流电网装备的经济性与安全性至关重要。

由于绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)具有驱动电路简单、开关速度快且损耗小、耐压高、通流强等优点, 在直流电网中得到了广泛应用。其中模块式 IGBT(plastic module IGBT, PMI)凭借成熟且简单的器件封装工艺得到了使用者们的青睐, 但是模块式 IGBT 内部芯片引线电极连接的设计使得芯片在发生故障失效时无法完全保证失效短路^[8], 同时树脂模块封装的设计使得器件经受较大故障浪涌电流时的抗破裂能力

基金项目: 国家自然科学基金委智能电网联合基金项目(U2166602)。

Integration Projects of National Natural Science Foundation of China-State Grid Joint Fund for Smart Grid (U2166602).

也较差，因此产业界和学者们逐渐转向对于大容量压接式 IGBT^[9-10]的开发和应用研究。

与大容量压接式 IGBT 类似，集成门极换流晶闸管^[11](integrated gate commutated thyristor, IGCT)也是一类大容量全控型压接式器件。相比 IGBT，IGCT 的开关频率较低(<1kHz)，但是也具有更高耐压、更大通流、更低导通压降、更高可靠性和更低的制造成本。在直流电网、新能源接入、超大容量变频等应用中，很多工作场景下的开关频率非常低，这些特点使得 IGCT 的低开关频率的劣势得到了规避，从而为 IGCT 的应用带来了重要契机^[12]。

综上所述，现有商用大容量全控型压接式器件主要包括以 IGBT(包含注入增强栅极晶体管(injection enhanced gate transistor, IEGT))为代表的晶体管类器件和以 IGCT 为代表的晶闸管类器件。图 1 展示了 3 种常见的商用大容量全控型压接式器件实物图对比，分别是日立 ABB 公司的 StakPak IGBT 器件^[13]，东芝公司的 IEGT 器件^[14]和清华大学与中车时代电气联合研制的 IGCT-Plus 器件^[15]。随着直流电网技术和工程化的推进，大容量全控型压接式器件的应用越来越广泛，但是现有文献均缺少对大容量全控型压接式器件芯片结构、工作原理及封装形式的系统性分析，对于其工作特性和不同场景下的应用区别等更是较少涉及。



图 1 商用大容量全控型压接式器件实物图对比

Fig. 1 Comparison of commercial large-capacity fully-controlled press-pack devices' pictures

本文对大容量压接式 IGBT 和 IGCT 器件原理、结构、特性及应用进行综合分析。首先对比不同压接式器件的芯片结构和制作工艺，然后围绕不同压接式器件的工作原理和封装形式对其工作频率、关断能力、动态耐受、器件容量、工作损耗、驱动功率、管壳防爆特性、失效短路特性与器件可靠性等展开深入对比分析，最后介绍全控型压接式器件的应用现状，并对其应用前景进行了展望。

1 芯片结构

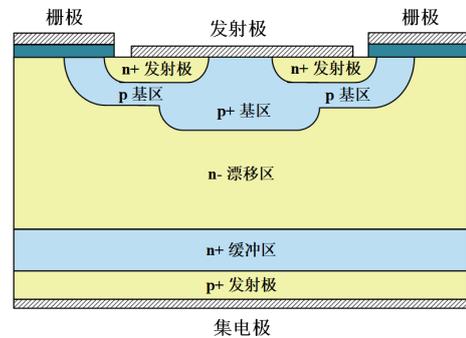
1.1 元胞纵向结构对比

IGBT 是继晶体管和金属氧化物半导体场效应

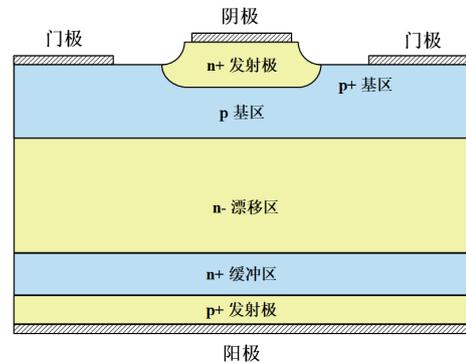
晶体管 (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)衍生而来的全控型功率器件。它集成了晶体管的大电流工作特性与 MOSFET 的栅极压控特性。IEGT 是由日本东芝公司在 IGBT 基础上对导通损耗进行优化的一款全控型功率器件，其芯片结构与 IGBT 十分类似。

图 2(a)给出了一种典型的平面栅极穿通型 IGBT 芯片的元胞纵向结构示意图。在其纵向设计上，一般在 N 沟道 MOSFET 的漏极侧增加一层 P+ 发射极，使 N 沟道 MOSEFT 与 PNP 晶体管结构在 IGBT 芯片内共存。前者为后者提供基极驱动电流，后者又可以调制前者的漂移区电导率，降低其通态电阻。但由于 IGBT 芯片内仍然存在寄生 NPNP 晶闸管结构，在高电流下可能会被触发开通进而旁路 MOSFET 沟道(门锁效应)，因此在 IGBT 芯片中通常引入一层深 P+ 基区以减少空穴电流的横向电阻^[16]，从而抑制寄生 NPNP 晶闸管的开通。

现有 IGBT 芯片还会在 n- 漂移区和 p+ 发射极之间中引入一层 n+ 缓冲区。由于 n+ 缓冲区中存在较高的空间电荷密度，因此在阻断状态下，当 IGBT 芯片中的电场穿越 n- 漂移区后，会在此区域快速



(a) IGBT 芯片的元胞纵向结构



(b) IGCT 芯片的元胞纵向结构

图 2 IGBT 与 IGCT 芯片的元胞纵向结构对比

Fig. 2 Comparison of the vertical cell structures in IGBT and IGCT chips

衰减,难以扩展到集电极的 p+发射极。相比传统无 n+ 缓冲区结构的纵向设计,具备 n+ 缓冲区结构的纵向设计在相同阻断电压目标下,可以达到缩减片厚从而降低芯片导通压降的目的^[16]。

IGBT 自提出起,导通损耗就是其短板之一。因此研究者们一直不断对此进行优化,主要采取沟槽栅极及载流子增强注入等结构以优化发射极侧的载流子浓度分布(例如 IEGT^[17])。同时近年来随着半导体工艺的不断发 展,又出现了精密布置沟槽栅极及其衍生栅极结构等新型设计^[18],以对 IGBT 的动静态特性进行综合优化。

IGCT 是继晶闸管衍生而来的全控型功率器件,图 2(b)给出了 IGCT 芯片的元胞纵向结构示意图。与 IGBT 芯片类似,IGCT 芯片在 n- 漂移区和阳极 p+ 发射极之间中也引入 n+ 缓冲区,在保证芯片阻断电压的同时,降低芯片导通压降。IGCT 芯片在阳极侧中也采用了类似 IGBT 芯片的透明阳极工艺^[19],对 P+ 发射极一侧的效率实现精细调控。这种设计既可以保证小电流下的发射效率,使得芯片易于开通,同时会抑制大电流下的发射效率,使得 n- 漂移区的电子在关断期间可以穿越透明阳极在金属电极界面处快速复合,从而减小芯片关断尾部电流和时间,降低芯片的关断损耗。

对比 IGBT 与 IGCT,尽管两者在 PNP 晶体管结构一侧都采用了 n+ 缓冲层、透明集电极(阳极)等结构,但是由于 IGBT 集成了 MOSFET 的栅极结构,因此其元胞纵向结构较为复杂。

1.2 元胞横向结构对比

在元胞横向结构设计上,IGBT 芯片中的元胞结构尺寸通常在微米及亚微米级别^[20],且元胞形状一般可采用方形元胞、圆形元胞、条形元胞、原子晶格元胞等图案方式^[16]。由于 IGBT 芯片的元胞结构精细复杂,整晶圆芯片的成品率低,因此 IGBT 芯片通常是从一片晶圆切割下来的分立芯片。

不同的元胞形状及空间布置对于 IGBT 的工作特性(尤其是抗门锁能力)影响较大,同时还可能会引发结构与工艺不匹配造成的污染缺陷等问题,引起良率下降。基于这些考虑,现有高压 IGBT 芯片通常采用工作特性较优且工艺良率相对较高的条形元胞设计方式。图 3(a)给出了基于条形元胞的 IGBT 的横向结构示意图。

相比 IGBT 芯片,IGCT 芯片的元胞结构尺寸通常在百微米级别,一般也采用工作特性较优且工

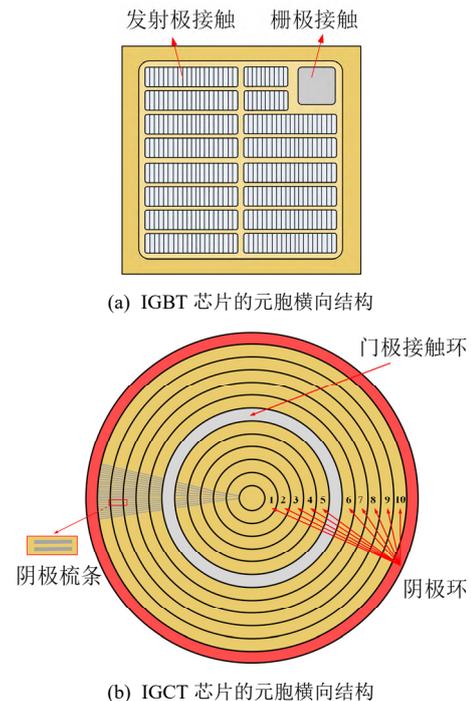


图3 IGBT与IGCT芯片的元胞横向结构对比
Fig. 3 Comparison of the horizontal cell structures in IGBT and IGCT chips

艺实现较易的条形元胞设计方式。由于 IGCT 的元胞结构简单,芯片成品率高,因此 IGCT 芯片通常是整晶圆芯片。图 3(b)为基于条形元胞的 IGCT 芯片横向结构示意图。可以看到在 IGCT 芯片中一般采用同心环形排列的条形阴极元胞设计,门极电极区域环绕条形阴极元胞分布,并由位于晶圆中间位置的门极接触环引出。同心环形排列的条形阴极元胞设计有利于 IGCT 在关断期间快速完成阴极向门极的电流转移,并降低阴极元胞在换流期间的空穴电流横向电阻,确保 IGCT 在关断期间从晶闸管向晶体管的稳定过渡。而围绕条形阴极元胞整面分布的门极区域可以在 IGCT 开通过程中为门极触发电流的迅速扩展提供低阻横向路径,使得 IGCT 芯片的开通速度得到大幅提升,使之适用于高 di/dt 速率开通^[21]的应用场景中。

1.3 终端结构对比

由于 IGBT 与 IGCT 在元胞结构、芯片形状及尺寸方面的差异,因此两者终端结构也不相同。IGBT 一般采用如图 4(a)所示的多重场环配合场板的终端设计^[22]。这种设计通过优化终端 PN 结的曲率,降低峰值电场以实现阻断电压。IGCT 一般采用如图 4(b)所示的类晶闸管的斜角终端设计^[23]。这种设计通过控制斜角位置与角度来拓展终端耗尽层宽度,降低峰值电场以实现阻断电压。

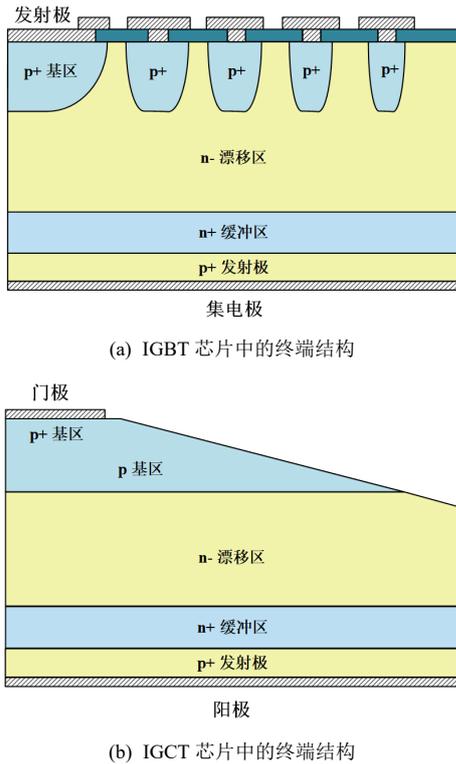


图 4 IGBT 与 IGCT 芯片的终端结构对比
Fig. 4 Comparison of the terminal structures in IGBT and IGCT chips

1.4 制作工艺对比

由于 IGBT 与 IGCT 芯片结构的不同，使得其在制作工艺上存在显著差异。

IGBT 芯片在制作时一般采用离子注入、杂质退火、氧化层生长及光刻、多晶硅淀积及光刻、硼磷硅玻璃(Boro-phospho-silicate glass, BPSG)淀积及回流、电极蒸镀及合金等工艺^[24]，工序步骤通常较为繁琐。由于 IGBT 芯片的元胞结构尺寸较小且可能存在复杂栅极结构(如沟槽栅)，因此在芯片制作时需要更精细的光刻线条及各向异性较好的干法刻蚀工艺，对于工艺误差的要求较为严苛。同时由于 IGBT 的栅极压控特性对于元胞的栅极电容等参数十分敏感，因此低污染高可靠的栅极氧化层的制作尤其重要。

IGCT 芯片在制作时一般以晶闸管的高温扩散、氧化层生长及光刻、斜角腐蚀及钝化、电极蒸镀及合金等工艺^[25]为基础，辅以部分离子注入环节^[26]，工序步骤通常较为简单。由于 IGCT 芯片的元胞尺寸较大，因此光刻线条较宽，对于误差工艺的要求较为宽松，采用低成本、高效率的湿法腐蚀工艺即可完成元胞的制作。同时由于 IGCT 的门极电流控制特性对于门阴极隔离氧化层的特性较不

敏感，因此常规氧化层的制作工艺即可满足 IGCT 芯片的制作要求。

表 1 为 IGBT 与 IGCT 在芯片结构与制作工艺上的对比。由于 IGCT 在芯片结构上具有类似晶闸管的大部分纵向及终端结构特征和比 IGBT 芯片更大的元胞尺寸，因此 IGCT 芯片在制作工艺上具有更简单的工艺步骤及更宽松的工艺误差要求。

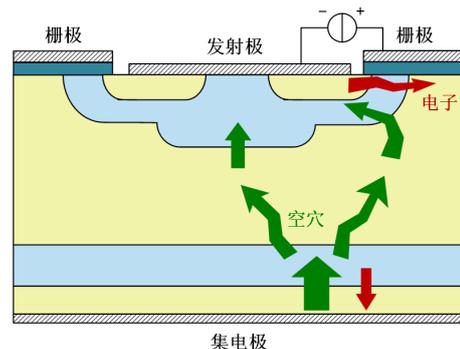
表 1 IGBT 与 IGCT 的芯片结构与制作工艺对比
Table 1 Comparison of structures and manufacturing process of IGBT and IGCT chips

器件类型	IGBT	IGCT
芯片规格	一片晶圆切割下来的分立芯片	整个晶圆
纵向结构	衍生自 MOSFET 及晶体管	衍生自晶闸管
终端结构	多重场环及场板结构	斜角终端结构
元胞尺寸	微米及亚微米级	百微米级
光刻误差	要求较严苛	要求较宽松
刻蚀工艺	干法刻蚀为主	湿法腐蚀为主
氧化隔离	低污染高可靠的栅氧要求	无特殊要求
工艺步骤	工序较繁琐	工序较简单

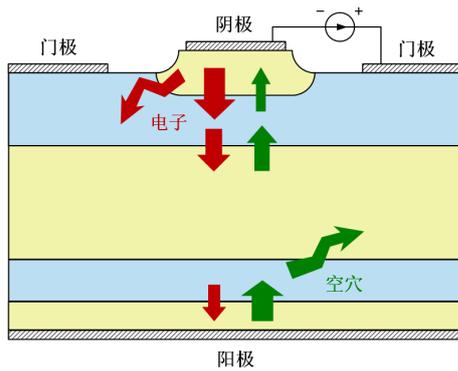
2 工作原理

2.1 开通原理

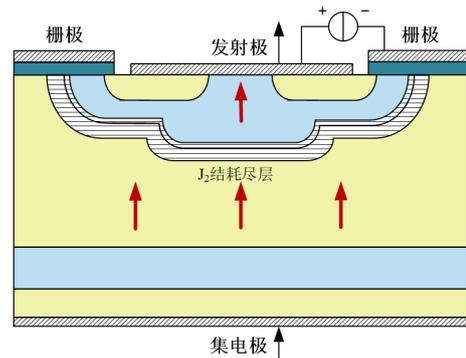
IGBT 在开通时需要控制栅极-发射极进入正偏状态。处于正偏状态的栅极下侧 P 基区中会形成一层反型层，该反型层作为连接 N+ 发射极与 N- 漂移区的电子沟道，实现电子向 N- 漂移区的注入。注入的电子又作为 PNP 晶体管的基极电流促使 IGBT 的 P+ 发射极向 N- 漂移区发射大量空穴，从而实现 N- 漂移区的电导调制效应，如图 5(a)所示。电导调制效应使得 IGBT 相比 MOSFET 的导通压降更低，但由于 IGBT 中寄生 MOSFET 结构，因此整体压降依旧包含 MOSFET 沟道电阻带来的压降成分。在 IGBT 的开通过程中，栅极正偏电压的建立过程对于开通速度以及损耗有着重要影响，而这一般需要通过栅极驱动开通回路电阻等进行调控。



(a) IGBT 的开通原理示意图



(b) IGCT 的开通原理示意图



(a) IGBT 的关断原理示意图

图5 IGBT 与 IGCT 的开通原理对比

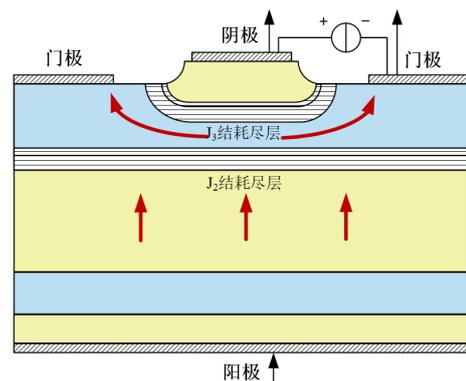
Fig. 5 Comparison of IGBT and IGCT's turn-on principles

IGCT 在开通时需要从门极注入触发电流。注入门极的触发电流会激发芯片体内寄生 NPN 和 PNP 互补晶体管的电流放大作用,使得体内迅速充斥大量来自阴、阳极发射极的电子与空穴,产生较强的电导调制效应。因此 IGCT 具备非常低的导通压降水平,如图 5(b)所示。与一般晶闸管不同的是,在 IGCT 的开通及导通过程中,注入门极的电流通常被设定为具有较高电流上升率和峰值的窄脉冲触发电流和稳态维持电流的叠加^[27],这种设计使得 IGCT 兼具快速开通和稳定导通的特性。

2.2 关断原理

IGBT 在关断时需要控制栅极-发射极的偏置状态反转。在栅极-发射极偏置状态反转的过程中,栅极电压首先下降至米勒平台阶段,然后 IGBT 体内 J_2 结处的耗尽层产生并拓展,IGBT 开始建立集电极电压。在集电极电压建立过程中,栅极电压进一步下降,使得连接 N^+ 发射极与 N^- 基区的 P 基区中的电子沟道被夹断, N^+ 发射极停止向 N^- 漂移区注入电子,如图 6(a)所示。当 IGBT 集电极电压建立到母线电压后,P 基区的存储电荷被迅速抽出,集电极电流迅速下降。最后 N^- 漂移区残余的过剩载流子通过体内复合过程逐渐衰减,形成拖尾电流。

在 IGBT 关断过程中,为了避免不良电流细丝的形成,首先需要提高 IGBT 的抗闩锁特性,此外还需调整 P^+ 发射极的注入效率并改进 N^+ 缓冲区设计,以调控 IGBT 在高压大电流关断工况下的动态雪崩效应^[28],确保 IGBT 的关断电流能力。同时与 IGBT 的开通过程类似,考虑到栅极偏置状态反转过程对于 IGBT 关断速度的影响,一般需要优化栅极驱动关断回路电阻^[29]、外部回路杂散电感等参数,以降低 IGBT 的关断损耗与关断过电压。



(b) IGCT 的关断原理示意图

图6 IGBT 与 IGCT 的关断原理对比

Fig. 6 Comparison of IGBT and IGCT's turn-off principles

IGCT 在关断时首先需要将阴极电流快速转移至门极。完成电流转移后的 IGCT 的 J_3 结耗尽,阴极停止向体内发射电子,然后 IGCT 转换为基极开路的晶体管,随后经历与 IGBT 类似的 J_2 结耗尽层拓展与阳极电压建立、P 基区存储电荷抽出与阳极电流下降、 N^- 漂移区过剩载流子复合与拖尾电流形成等过程,如图 6(b)所示。

在 IGCT 关断过程中,为完成 IGCT 门阴极电流的快速转移,门极驱动及管壳封装需要提供低感的电流转移路径,从而确保 IGCT 从晶闸管向晶体管的稳定过渡。因此 IGCT 通常采用集成门极驱动结构以减少换流回路电感。当 IGCT 进入晶体管模式后,优化的纵向掺杂结构^[30]、元胞尺寸参数以及元胞横向排布设计^[31]均有助于抑制 IGCT 中晶体管向晶闸管重新转变的重触发效应^[32],从而确保 IGCT 的关断电流能力。

对比 IGBT 与 IGCT,由于 IGCT 在开通时具有更强的电导调制效应,因此开通损耗与导通压降更低。但是与 IGBT 可以通过栅极驱动调节开通特性不同,IGCT 的开通特性无法通过门极驱动进行调控。因此 IGCT 与快速恢复二极管(fast recovery

diode, FRD)在换流过程中的 di/dt 主要取决于外回路参数。为了确保 IGBT 与 FRD 换流过程的顺利进行, 通常需要增设回路阳极电感, 而为了抑制增设电感带来的过电压, 还需要匹配由电容、电阻及二极管组成的钳位电路, 以保证 IGBT 在关断期间的过电压不超过安全工作区。

由于 IGBT 在导通时基区存在更多的非平衡载流子, 所以关断时载流子抽出时间通常较长, 关断速度较慢, 关断损耗较高。而现有面向低频应用场景优化的 IGBT 会在开通时向基区注入更多的非平衡载流子, 因此其关断损耗也有所增加。另外, 在驱动方面, 由于 IGBT 驱动在关断时需要进行大电流转移, 稳态时又需要持续注入维持电流, 因此相比 IGBT 驱动的工作频率低、驱动功率大。

3 封装形式

商业大容量全控型压接式器件的封装形式主要分为硬压装结构和弹簧压装结构。其中硬压装结构又分为整晶圆硬压装结构以及多芯片硬压装结构, 弹簧压装结构则主要应用于多芯片并联的封装结构中。

3.1 多芯片弹簧压装结构

图 7^[33]展示了 ABB 公司生产的 4500V3000A 多芯片弹簧压装结构 IGBT 器件的组成结构^[13]。整个器件包含 6 个 IGBT 子模块, 各个子模块具有相同的电压电流等级(4500V/500A), 通过并联工作提升整个器件的额定工作电流。每个 IGBT 子模组内部采用多层封装形式, 主要包含绝缘外壳, 发射极及栅极碟簧、集电极基板以及 IGBT 芯片等。

IGBT 子模块内部芯片的集电极通过焊层焊接在集电极基板上, 芯片的栅极通过键合线连接到基板的栅极接触区, 这与模块式 IGBT 中芯片的栅极引出方式相类似。但与模块式 IGBT 不同的是, 在多芯片弹簧压装结构 IGBT 中, 外部通过缓冲碟簧结构对芯片的发射极施加机械压力。这可以有效缓

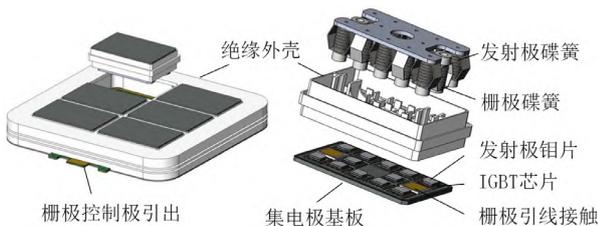


图 7 多芯片弹簧压装结构 IGBT 的组成示意图

Fig. 7 Schematic diagram of IGBT's composition with multi-chip spring press-pack structure

解因机械结构加工精度及外部压装结构失配造成的压力不均匀问题, 保证器件内部各芯片间压力的均衡^[9]。但是由于缓冲碟簧结构的存在, 这种封装结构不能达到有效的双面散热, 两侧热阻不对称性较大。此外, 虽然每个 IGBT 子模块内部会灌入硅胶将 IGBT 芯片密封保护, 但由于 IGBT 子模块绝缘外壳采用粘接方式连接, 因此整个子模块的内部抗压强度较低。

3.2 多芯片硬压装结构

图 8 展示了东芝公司生产的 4500V3000A 多芯片硬压装结构 IEGT 器件的组成结构^[14]。整个器件采用传统晶闸管的密封封装形式, 其内部结构为栅格状, 布置有 42 个 IEGT 芯片。各芯片电压、电流等级相当, 通过并联提升整体器件的额定工作电流。每个 IEGT 芯片独立占据一个栅格位置, 芯片的集电极和发射极分别通过钼片与集电极电极、发射极凸台电极接触。

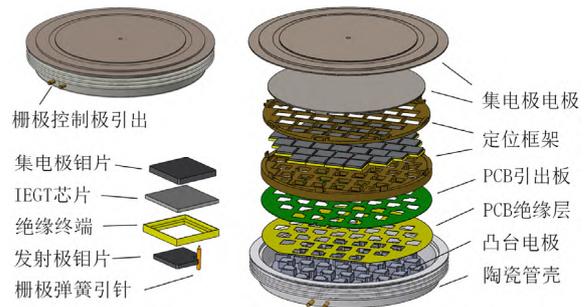


图 8 多芯片硬压装结构 IEGT 的组成示意图

Fig. 8 Schematic diagram of IEGT's composition with multi-chip hard press-pack structure

英飞凌公司近年提出的 4500V3000A 压接式 IGBT^[34]也具有与 IEGT 相似的封装结构。但英飞凌公司 IGBT 的内部芯片定位方式与 IEGT 不同, 同时其 IGBT 芯片与钼片之间采用了银烧结工艺进一步增强了芯片的抗热疲劳性。这种多芯片硬压装结构与多芯片弹簧压装结构在栅极引出方面存在显著不同: 每个 IEGT 或 IGBT 芯片的栅极通过定制的弹簧引针连接到具有公共栅极引出端的 PCB 板上, 并通过优化的凸台电极布局和 PCB 走线布置减小各芯片间的栅极信号延迟^[35]。

相比多芯片弹簧压装结构 IGBT, 多芯片硬压装结构 IEGT 具有较好的双面散热特性和可靠的栅极连接。但是由于其内部仍然存在多个并联芯片, 芯片的压力均匀性受机械结构加工精度及外部压装结构影响较大。因此为避免器件工作容量降级,

需要确保多凸台电极管壳结构及各部件的加工平整度,并设计合理的外部压装结构。

3.3 整晶圆硬压装结构

无论是多芯片弹簧压接结构还是多芯片硬压接结构,采用多并联 IGBT(含 IEGT)芯片带来的复杂结构设计都无法避免。而采用整晶圆硬压接结构的 IGCT 器件,由于芯片两侧几乎整面接触双侧的电极结构,因此 IGCT 器件在大容量全控型压接式器件中具有最简单的封装结构。

图 9 为四英寸整晶圆硬压装结构 IGCT 的组成示意图,主要包括门极驱动器、管壳电极、阴阳极铝片、门极接触环、门极绝缘附件和 IGCT 芯片等。封装结构设有门极控制极接口,用于与门极驱动器连接。整晶圆硬压装结构的管壳电极和铝片等结构易于加工,并可有效保证平整度,同时该结构还具备良好的双面散热特性,有利于控制 IGCT 在大功率运行条件下的结温状态。

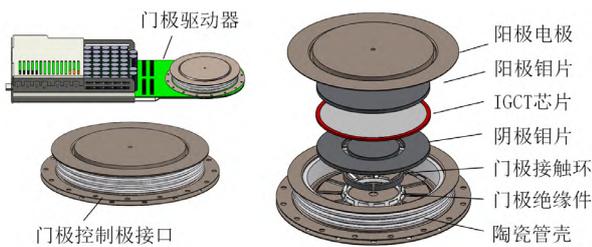


图 9 整晶圆硬压装结构 IGCT 的组成示意图

Fig. 9 Schematic diagram of IGCT's composition with single-chip hard press-pack structure

表 2 对比了不同全控型压接式器件的封装结构形式。可以看到,采用整晶圆硬压装结构的 IGCT 器件具有最少的零件数目和最低的装配难度,门极引出方式也采用了较为可靠的弹性压接方式^[36]。同时与整晶圆芯片配合的管壳结构各部件平整度较易控制,并可保证接近对称的双面散热特性。

表 2 不同全控型压接式器件封装形式对比

Table 2 Comparison of different fully-controlled press-pack devices' packaging structures

结构类型	多芯片弹簧压装	多芯片硬压装	整晶圆硬压装
代表器件	StakPak IGBT	IEGT/IGBT	IGCT
芯片数目	多个芯片	多个芯片	单个芯片
零件数目	较多	较多	较少
装配难度	较困难	较困难	较简单
栅/门极连接	引线连接	弹性压接	弹性压接
平整度控制	较容易	较困难	较容易
散热特性	双面散热不对称	双面散热接近对称	双面散热接近对称

4 工作特性

4.1 工作频率

由于 IGBT 在关断过程中不涉及驱动回路中大电流的转移,驱动电压信号响应频率较高,所以器件的工作频率较高,可达数千赫兹以上。而 IGCT 在关断时需要将大电流从阴极换流至门极,因此需要具有一定容值的关断电容组支撑换流期间转移的电荷量,并维持驱动施加在门阴极间的反偏电压。因此 IGCT 在每次关断后都需要通过外部驱动电源对关断电容组充电,以补充其损失的电荷量,并使得关断电容组的电压恢复至关断前的状态。因此 IGCT 的工作频率会受到驱动中关断电容组充电速率的限制,通常适用于数百赫兹至一千赫兹范围工作频率的应用场景中。

虽然 IGCT 工作频率较 IGBT 更低,但在现有柔性直流输电技术中,存在大量低频率及单次工作的应用场景。在这些场景中,IGCT 可以规避掉工作频率低的问题,展现出其低成本、低损耗和高可靠的优势。

4.2 关断能力

在 IGBT 的关断初期阶段,反型沟道的延缓关闭使得其在建立电压时仍然存在一定的电子注入,这在一定程度上可以抑制 IGBT 在关断期间的动态雪崩效应^[37]。但当沟道完全关闭后,仍然需要优化的纵向掺杂设计以抑制 IGBT 在高电压大电流下动态雪崩的不稳定发展,确保 IGBT 的成功关断^[28]。由于现有 IGBT 器件一般采用多芯片并联的工作方式,因此其关断能力除受单 IGBT 芯片的关断能力影响外,也与各并联芯片间的均流、关断一致性等紧密相关。这通常需要从封装结构设计出发,确保芯片的压力均匀性以及各并联芯片间的栅极杂散参数均匀分布。

IGCT 在关断时首先需要实现晶闸管模式向开路晶体管的稳定过渡,确保 IGCT 在阳极电压建立时,阴极不再发射电子。因此可以实现快速换流的低感封装及驱动对于确保 IGCT 的关断能力十分重要。现有 IGCT 技术中封装驱动的总杂散电感可达 1nH 以下,可以确保高达 17kA/ μ s 以上的极限换流能力^[38]。另外与 IGBT 类似,IGCT 也需要优化的纵向掺杂结构^[30]对其在关断期间的动态雪崩效应进行调控。此外,由于 IGCT 在关断时需要保证芯片内的数千个工作单元均可可靠关断,所以还需要优

化的横向排布设计^[31]避免电流局部汇聚导致 IGCT 失效。

随着芯片制作工艺和封装驱动技术的不断进步, 现有 4.5kV 的 IGBT 器件具备在额定直流母线电压下重复关断 6kA 的能力, 同时在配合缓冲吸收支路以及满足额定工作结温时, 单次最大关断电流可达 15kA 以上^[39]。而现有 4.5kV 的四英寸 IGCT 器件具备在额定直流母线下重复关断 6.5kA 的能力^[40]。4.5kV 的六英寸 IGCT 器件单次最大关断电流也达到 12kA 以上^[41], 且随着集成发射极关断晶闸管等新型驱动方式的应用^[42], 单次最大关断电流也可进一步提升至 15kA 以上。

4.3 动态耐受

IGCT 的动态耐受能力主要包括 di/dt 与 dv/dt 两个方面。在 di/dt 耐受能力方面, 由于 IGCT 的开通特性无法像 IGBT 一样通过驱动进行调控, 因此 IGCT 与 FRD 在换流过程中的 di/dt 主要取决于外回路参数。为了确保 IGCT 与 FRD 换流过程的顺利进行, 在工作电路中通常需要配置较大的阳极电感对 IGCT 与 FRD 换流时的 di/dt 进行限制, 较大的阳极电感使得整个回路体积较大且较为笨重。在 dv/dt 耐受能力方面, 黑启动等器件未供电、门极电位悬浮的工况对于器件的 dv/dt 耐受能力提出了较高要求。与传统晶闸管类似, 较高 dv/dt 会在 IGCT 主结电容中产生位移电流^[16]。在门极电位悬浮的情况下, 来自主结电容的位移电流流经门极区域抵达阴极时会误触发 IGCT, 易造成器件损坏。

随着具有高 di/dt 耐受能力的 IGCT-Plus 与 FRD 器件的提出, 现有 IGCT 与 FRD 换流过程的 di/dt 得到提升, 增设的回路阳极电感可以大幅减小。同时 IGCT-Plus 器件在驱动中集成了黑启动功能, 在器件未供电的情况下可确保门极电位与阴极电位相同, 从而消除了较高 dv/dt 下 IGCT 被误触发的风险。此外, 黑启动功能的加入也使得 IGCT 可以采用与 IGBT 类似的回路自取电方式完成驱动供电电源的用电输入。优化的阳极电感和取电方式等使得整个回路设计可以向紧凑化、轻量化方向发展。

4.4 器件容量

全控型压接式器件的容量主要包含额定工作电压(一般指阻断电压)与额定工作电流(一般指通态电流)两方面。

在阻断电压方面, IGBT 一般借助多重场环搭配场板的终端设计实现芯片的阻断耐压, 目前商用

全控型压接式 IGBT 器件的最高阻断电压为 5.2kV^[43]。IGCT 主要借助晶闸管的斜角终端设计获得较强的阻断耐压能力, 目前商用 IGCT 器件的最高阻断电压为 6.5kV^[44]。

在通态电流方面, 多芯片弹簧压装 IGBT 由于双面散热不对称, 因此在同等通态电流下需要采用更大尺寸的封装保证结温的稳定。多芯片硬压装 IEGT/IGBT 虽然可以保证接近对称的双面散热特性, 但由于其内部各并联芯片彼此独立, 因此在同等通态电流下也一般需要更大的封装尺寸。未来随着对更高通态电流特性的需求, IGBT 需要在封装内部并联更多的芯片, 这对于压接式 IGBT 的封装结构将带来更大的设计和制作难度。而 IGCT 由于导通压降较低且具备接近对称的较低双面热阻, 因此在相同封装尺寸下在可以运行在较高的通态电流下, 并且随着 IGCT 芯片晶圆尺寸的提升, 其通态电流也可以提升至更高水平。

4.5 工作损耗

全控型压接式器件的工作损耗主要包含导通损耗与开关损耗两方面。

在导通损耗方面, 由于 IGBT 中寄生 MOSFET 电子沟道电阻在其电流路径中不可避免, 因此在同等电流下, IGBT 导通损耗(压降)相比 IGCT 仍然高出许多。而随着沟槽栅极以及载流子增强注入等技术在大容量压接式 IGBT 器件中的应用, 其导通损耗(压降)得以降低, 但在最高结温和 3kA 电流条件下, 优化后导通压降相比 IGCT 仍高出 40%左右(前者 2.6V^[14], 后者 1.83V^[45])。

开关损耗包括器件开通损耗与关断损耗。在开通损耗方面, 由于 IGBT 开通速度受门极驱动参数和芯片内寄生电容参数等限制, 通常较慢, 因此开通损耗较高。而 IGCT 芯片布置有整面门极电极结构, 当芯片开通时, 驱动产生的强触发电流经由门极电极迅速传导, 使得各处单元快速开通, 电压下降时间较短且与回路中限制 di/dt 的阳极电抗参数无关, 因此开通损耗相比 IGBT 通常低得多。在最高结温和 3kA 电流条件下, IGCT 的开通损耗仅为 3J^[45], 而 IGBT 一般为 12J 左右^[13-14]。

在关断损耗方面, 芯片在导通时内部的非平衡载流子浓度是重要的影响因素之一。由于现有面向低频应用场景优化的 IGBT 芯片在导通时的非平衡载流子浓度得到提升, 因此 IGBT 的关断损耗相比传统型号有所增加。目前在最高结温和 3kA 电流条

件下,IGCT 的关断损耗在 17J 左右^[45],而 IGBT 的关断损耗在 20J 左右^[13-14]。

4.6 驱动功率

由于 IGCT 驱动在关断时需要电容组进行大电流转移,稳态时又需要持续注入维持电流确保导通状态,因此相比 IGBT 驱动,IGCT 驱动需要从电源侧输入更多功率确保关断电容组电压以及维持电流水平的稳定。且随着工作频率的提升,IGCT 驱动输入功率也显著增加。IGCT 驱动的这种特性使得其供电电源功率通常较高、体积通常较大。

但是在现有柔性直流输电技术的低频率工作场景中,IGCT 驱动的输入功率通常仅在 30W 左右,因此驱动供电电源的功率设计可以得到优化。此外,在柔性直流输电技术的高压环境中,驱动供电电源的体积设计主要考虑绝缘间隙配合,因此 IGCT 驱动在供电电源体积设计上与 IGBT 驱动相当,这可以使得整个回路设计更加紧凑。

4.7 管壳防爆特性

在管壳防爆特性方面,硬压装结构中的钎焊陶瓷管壳具有较好的密封特性,且硬压装结构中大面积直接接触的芯片-电极结构可以稳定承受常规故障时(如运行直通等)的浪涌电流。但是对于多芯片硬压装结构 IGBT,当器件发生闭锁后引发过压击穿时,极端浪涌故障电流可能会集中于靠近管壳边缘的位置^[46],引起管壳陶瓷局部瞬态温升过高,造成较大热应力而产生破裂。另外管壳内绝缘框架等高热阻结构在阻碍热传递的同时也会发生气化,导致管壳内压强增大,进一步促使管壳破裂及内容物泄出。而多芯片弹簧压装结构 IGBT 采用绝缘外壳与基板电极粘接的封装方式,内部抗压强度较低,因此同样无法有效阻隔内容物泄出。

而同样采用钎焊陶瓷管壳的整晶圆硬压装结构的 IGCT 不仅可以稳定承受常规故障时的浪涌电流^[47],在配合 IGCT 芯片的中心可控击穿设计^[48]后,可以进一步在器件发生闭锁时使其在指定电压下发生击穿,并将极端浪涌故障电流有效限制在芯片的中心区域附近。这种设计可以极大地降低管壳陶瓷的热应力^[49],使得器件保持原有管壳外观状态,抑制管壳破裂及内容物泄出,从而达到与旁路晶闸管^[50-51]相近的保护功能。

图 10 给出了多芯片并联结构的 IGBT(含 IEGT)器件和整晶圆结构的 IGCT 器件在器件闭锁状态下,经受极端浪涌故障电流后的管壳外观及内部芯

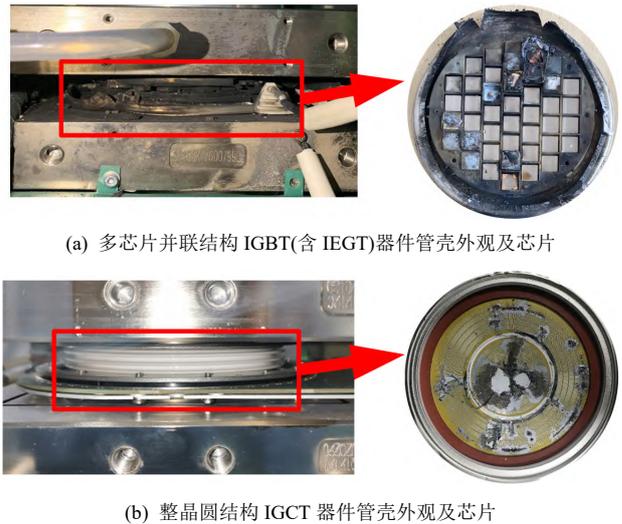


图 10 在极端浪涌故障电流条件下的管壳防爆特性对比
Fig. 10 Comparison of housing packages' explosion proof under the extreme faulty surge current

片解剖情况对比。当闭锁状态下的多芯片并联结构 IGBT(含 IEGT)器件发生过压击穿时,由于各并联芯片的击穿特性不确定,因此击穿点具有随机性,有可能会靠近管壳边缘。当极端浪涌故障电流涌入靠近管壳边缘的击穿点时,焦耳热使得击穿点附近的管壳陶瓷温度急剧上升,最终因承受较大热应力而发生破裂。同时管壳破裂后泄出的内容物也给邻近功率模块的安全运行带来安全隐患。而整晶圆结构 IGCT 器件通过中心可控击穿设计,使得过压击穿点位于中心区域,当极端浪涌故障电流涌入中心区域时,焦耳热较为均匀地向各个方向传递,管壳陶瓷承受的热应力较小。在多次的验证性实验中,管壳均未破裂同时内容物也未泄出。

4.8 失效短路特性

在失效短路特性方面,多芯片弹簧压装结构或硬压装结构 IGBT 在失效后一般仅由包含失效点的 IGBT 芯片承担通流。当短路通流提升后,由于各芯片彼此独立且栅极电位不确定,因此难以触发开通其他位置的 IGBT 芯片共同分担短路电流^[52]。另外绝缘框架等高热阻结构的存在也使得芯片间依靠热传递实现失效区域扩展变得困难^[53]。同时失效点电阻在长期下会发生显著提升^[54-55],因此无法完全确保失效 IGBT 的短路压降在各个短路通流水平下均维持在较低水平。目前商用的多芯片弹簧压装结构 IGBT 仅可确保失效后 1min 的长期短路能力。

而失效的 IGCT 在较低的短路电流情况下一般可借助失效区域稳定导通短路电流。随着短路电流的提升,失效的 IGCT 又可借助短路电流触发失效

区域邻近的正常阴极元胞开通，分担短路电流，促进失效区域扩展^[56]，从而确保失效 IGCT 的短路电压降在各个短路通流水平下均维持在较低水平。

图 11 给出了局部损坏失效的多芯片并联结构的 IGBT(含 IEGT)器件和整晶圆结构的 IGCT 器件在进行相同时间短路通流测试前后的内部芯片解剖情况对比。可以看到在多芯片并联结构的 IGBT(含 IEGT)器件中，初始失效点附近的芯片受到了失效区域通流产生的高温作用，烧蚀最为严重，但是更远处的芯片却难以受到高温作用。而在整晶圆结构的 IGCT 器件中可以看到失效区域沿着初始失效点向邻近元胞区域不断扩展，使得短路通流区域不断增加。在多次的验证性实验中，失效 IGCT 均具有长期稳定的失效短路特性^[56]。

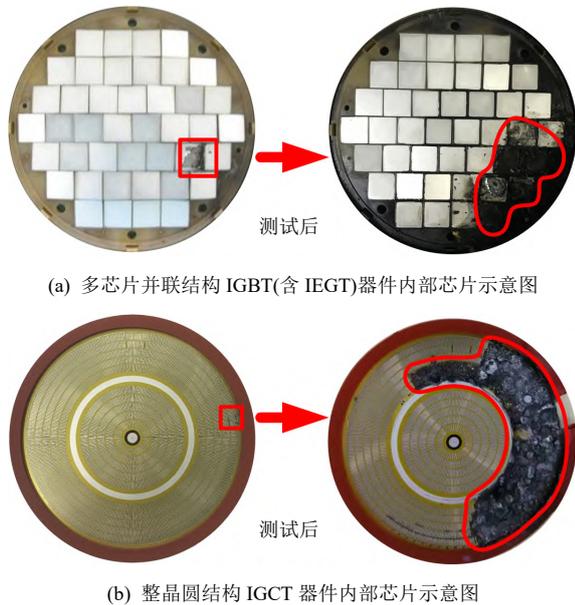


图 11 局部损坏失效器件内部芯片在短路测试前后的对比

Fig. 11 Comparison of the chips in devices with local failure areas before and after the short circuit tests

表 3 为不同器件的管壳防爆与失效短路特性对比。可以看到，相比多芯片弹簧压装结构或硬压装结构的 IGBT 或 IEGT，采用整晶圆硬压装结构的 IGCT 具有最强的管壳防爆特性以及长期稳定的失效短路特性。

表 3 不同器件的管壳防爆与失效短路特性对比

Table 3 Comparison of different power devices' explosion proof and short circuit failure characteristics

器件	StakPak IGBT	IEGT/IGBT	IGCT
压接封装结构	多芯片弹簧压装	多芯片硬压装	整晶圆硬压装
管壳防爆特性	非常弱	较弱	强
失效短路特性	非常弱	较弱	强

4.9 器件可靠性

在器件可靠性方面，现有文献统计和分析表明，IGCT 器件的故障率可以达到 100FIT(1FIT 表示设备每工作 10⁹h 发生 1 次故障)以内^[11]。对从现场运行 15 年以上返回的 IGCT 器件分析表明，IGCT 芯片的电学参数均在合格范围内，同时驱动中由电容和 MOSFET 组成的关断回路没有发现显著退化，而 IC 控制电路及非关断回路中的 MOSFET 是造成 IGCT 驱动失效的主要原因^[57-58]。对 8MVA 三电平变频器应用场景中使用的器件进行失效率分析及预测，结果表明 IGBT 的综合失效率约为 IGCT 的两倍左右^[59-60]。

5 应用现状与展望

5.1 应用现状

在过去较长时间内，电力电子以低电平变频器的发展为主，通过提高开关频率可以提高功率密度、改善谐波特性。在此背景下，具有高开关频率的 IGBT 成为主流，在轨道交通、工业变频、家用电器、新能源逆变器等领域广泛应用，形成了良好的产业生态。随着电力电子技术向电网领域的衍生，变频器容量越来越大，模块式 IGBT 已无法满足应用需求，压接式 IGBT 应运而生。

在柔性高压直流输电领域，随着电压等级和容量的提升，高压大容量压接式 IGBT 器件得到了一定的应用。张北直流电网工程^[61]、昆柳龙混合直流输电工程^[62]、正在建设的如东海海上柔性直流输电和白鹤滩混合直流输电工程中均使用了压接式 IGBT 器件，涉及的装备包括：模块化多电平换流阀、混合式直流断路器^[63-65]、直流耗能装置^[66-67]等。

由于开关频率较低，IGCT 在中小容量应用领域不如 IGBT 应用广泛，但是在轧钢冶金^[68]、风电变频器^[69]、STATCOM^[70]、抽水蓄能等低频大容量应用领域中，一直受到青睐。例如，ABB 公司 PCS6000/PCS8000 变频器一直采用 IGCT 器件，深圳禾望 6MW 以上的大容量风机变频器也是采用 IGCT 器件。自 1997 年 IGCT 器件诞生以来，全世界服役的 IGCT 数量已经达 20 万只以上，是目前全控型压接式器件里面应用数目最多的，相比压接式 IGBT 具有更多的运行经验。

事实上，不同于轨道交通等中低压应用场景，直流电网中电力电子设备具有较多新的运行特点，例如：MMC 换流器依靠多电平运行方式大幅降低

了器件开关频率(小于 200Hz), 直流断路器仅需单次关断, 直流变压器具有较高的软开关特性。这使得 IGBT 开关速度快等优势无法发挥, 反而为 IGCT 的应用带来了契机^[71-72]。尤其是, 随着直流电网定制化设计的 IGCT-Plus 器件的成功研制^[15], 使得 IGCT 黑启动困难、 di/dt 耐受能力弱、驱动功率大等瓶颈被克服, 而成本低、损耗小、可靠性高、安全性好等优势得以充分发挥。

近年来, IGCT 器件在直流电网领域的应用逐渐得到重视, 并有了较快的发展。在直流断路器领域, 2015 年 ABB 研发了基于逆阻型 IGCT 的 1kV/1kA 全固态直流断路器^[73]。2016 年清华大学基于 IGCT 的直串技术研发了 10kV/3.6kA 混合式直流断路器样机^[74], 并于 2018 年在东莞交直流混合配电网工程中, 成功应用基于 IGCT 的 $\pm 375\text{V}/5\text{kA}$ 全固态式直流断路器^[75]。上海思源电气则在张北柔直工程的 500kV 机械式断路器中首次应用 IGCT 器件, 解决了传统直流断路器直流开断后故障清除时间长的问题^[76]。

在 MMC 换流器领域, 2018 年清华大学和北京四方公司联合研发了基于 IGCT-Plus 交叉钳位技术的 10kV/10MW MMC 换流器, 并应用于珠海“互联网+”智慧能源示范工程中, 这是国产 IGCT-Plus 器件在柔性直流输电换流阀中的首次亮相^[77-78]。2020 年清华大学、西电电力系统公司、三峡集团联合研制了面向千兆瓦级柔性直流输电的 IGCT-MMC 换流阀塔。该换流阀塔采用我国自主化研制的 4500V/5000A IGCT-Plus 器件, 子模块容量 2100V/2100A, 整机容量 $\pm 10\text{kV}/60\text{MW}$, 损耗为 0.5%, 具有本征安全的防爆特性。

在直流变压器领域, 2020 年清华大学成功研制基于 IGCT-Plus 器件和中频隔离的 MW 级 DC-DC 模块; 2021 年北京四方公司成功研制基于 4.5kV IGCT-Plus 器件的 20kV/10MW 直流变压器, 并应用于东莞中压配网互联工程, 相比基于 SiC 和高频隔离的直流变压器, 功率密度提高 1 倍, 效率达到 99%; 2021 年西电电力系统公司成功研制基于 6.5kV IGCT-Plus 器件的 10kV/3MW 直流变压器, 并应用于乌兰察布“源网荷储”示范工程。

除上述应用外, 在直流耗能装置^[79]领域, 清华大学研制的基于 IGCT-Plus 的 160kV 直流耗能装置也成功通过第三方见证实验, 该装置中开关频率达到 500Hz, 电流达到 1500A。另外, 正在开展的基

于逆阻型 IGCT 的传统直流输电换流阀研制工作, 可有效抵御换相失败, 为进一步深化 IGCT 研究和其创新应用拓展了新的思路 and 方向^[15]。

5.2 展望

随着我国“碳中和”和“碳达峰”工作目标的提出, 直流电网技术作为新能源远距离输送和维护电网安全稳定运行的关键技术将承担越来越重要的角色。更高电压和更大容量的 MMC 换流器、直流断路器、直流变压器等电力电子装备将得到进一步发展, 具有更大容量、更高可靠性与安全性的大容量压接式器件将得到广泛应用。

目前, ABB 公司压接式 IGBT 器件最大容量为 5200V/3000A, 东芝和英飞凌公司器件为 4500V/3000A。我国仅有中车株洲时代半导体公司具有生产压接式 IGBT 的能力, 容量为 4500V/3600A^[80]。各 IGBT 制造厂家也在积极开发更高阻断电压和通态电流水平的 IGBT 样品。但 IGBT 向更高阻断电压(6.5kV 以上)等级发展需要更加复杂的终端设计工艺或是采用击穿场强更高的碳化硅材料。同时, IGBT 为提升通态电流水平, 需要增加并联芯片数目, 进一步扩大封装尺寸, 而这对芯片特性的一致性、封装结构的加工精度等提出了更高的挑战。因此, 具有更高阻断电压和通态电流水平的压接式 IGBT 的制造更加困难, 需要更长时间的芯片工艺迭代、测试和考核。

对于 IGCT 器件, 目前容量水平已经达到 6.5kV/6kA(平均电流 3kA)。我国中车株洲时代半导体公司和西安派瑞公司依托扎实的晶闸管工艺基础, 均实现了 IGCT 的自主化生产。在阻断电压方面, IGCT 制造厂家已经开发出了阻断电压 6.5kV 及 10kV 的四英寸 IGCT 样品^[81]。在电流容量方面, 厂家也已开发出具备更大通态电流水平的六英寸样品, 并具备 10kA 以上的最大电流关断能力^[82]。

传统 IGCT 器件在应用时存在黑启动困难、 di/dt 耐受能力弱、驱动功率大且供电复杂等难点。这些问题仍然是限制更大容量 IGCT 器件应用的瓶颈, 因此对于更大容量 IGCT 器件的黑启动功能设计、 di/dt 耐受能力评估、驱动功率及供电方式优化等是未来需要持续关注和解决的问题。目前, 随着 6.5kV 等级 IGCT 器件的成功研制, MMC 等直流电网关键装备的子模块级联数目将大幅减少, 使得成本、体积、损耗大幅下降。这将会大幅提高柔性直流输电的技术经济性和可靠性, 使之成为远距离大

容量输电和电网互联的主要手段，有望实现全国范围内和各区域柔性电网输电互联，同时促进大规模海上风电等新能源的迅速发展，支撑我国双碳目标的实现，并将对我国未来电网格局产生重要影响。

6 结论

大容量全控型压接式器件主要包含以 IGBT(含 IEGT)为代表的晶体管类器件和以 IGCT 为代表的晶闸管类器件，两种类型器件的结构特征与工作特性归纳如表 4。

表 4 IGBT 与 IGCT 的结构特征与工作特性

Table 4 IGBT and IGCT's structures and characteristics

器件类型	IGBT	IGCT
芯片结构	小尺寸芯片，元胞较复杂	整晶圆芯片，元胞较简单
封装形式	复杂的多芯片并联封装	简单可靠的整晶圆封装
制作成本	结构复杂，成本较高	结构简单，成本较低
开关频率	较高，数千赫兹以上	较低，数百赫兹
关断能力	强	较强
动态耐受	di/dt 通过驱动可控	di/dt 通过回路电感控制
	黑启动下 dv/dt 耐受能力高	黑启动下 dv/dt 耐受能力高
工作损耗	开通和导通损耗较高	开通和导通损耗较低
	低频优化后关断损耗较高	关断损耗较高
驱动功率	较低	较高，低频下显著下降
容量特性	容量提升尤其是电流较难	容量提升较容易
安全特性	管壳防爆和失效短路特性弱	管壳防爆和失效短路特性强

1) 结构特征。

在芯片结构方面，IGBT 集成了 MOSFET 的精细栅极结构，其元胞结构相比 IGCT 更加复杂，工艺步骤更多且工艺误差控制要求更高，因此导致了大尺寸 IGBT 芯片的成品率较低。在封装结构方面，IGBT 采用多个小尺寸芯片并联来提高器件容量，而多芯片压装结构需增设大量绝缘框架、栅极引针或引线、弹簧均压元件等；相比之下，IGCT 直接采用整晶圆芯片，无需并联，封装结构更加简单、可靠。同时 IGCT 相比 IGBT 更为简单的芯片工艺和封装结构也使得其成本更低。

2) 工作特性。

与 IGBT 相比，IGCT 开通时具有更强的电导调制效应，因此开通损耗与导通压降更低。现有面向低频应用场景优化的 IGBT 关断损耗有所增加，因此 IGCT 在关断损耗上与其持平。IGCT 与高压晶闸管相近的耐压终端以及双面散热封装设计使得其容易实现更高容量器件的开发。同时，中心可控击穿设计以及整晶圆芯片失效区域的扩展特性使得 IGCT 还具备极端浪涌故障电流冲击下的管壳

抗爆能力与长时稳定的失效短路能力。

IGCT 采用的电流型驱动相比 IGBT 的电压型驱动，开关频率通常较低，驱动功率通常较大。但是在低频应用场景中，IGCT 的驱动功率会显著下降，使得驱动供电电源得到优化。同时由于 IGCT 的开通特性无法通过驱动进行调控，因此需要增设回路电感限制 IGCT 与 FRD 在换流时的 di/dt 。但随着具有高 di/dt 耐受能力的 IGCT-Plus 与 FRD 器件的提出，现有 IGCT 与 FRD 换流过程的 di/dt 得到提升，增设的回路电感可以大幅减小。与此同时，IGCT-Plus 器件在驱动中集成的黑启动功能也提升了 IGCT 的 dv/dt 耐受能力并使得驱动电源可以实现自取电，回路设计可以向紧凑化、轻量化发展。

总的来说，对于以 MMC 为代表的低频大容量应用领域，IGCT 运行频率低、驱动功率大等缺陷被规避，其损耗低、成本低、容量大、安全性好等优势得以充分发挥，具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 马为民, 吴方劫, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439.
MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439(in Chinese).
- [2] 李岩, 罗雨, 许树楷, 等. 柔性直流输电技术: 应用、进步与期望[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 7-13.
LI Yan, LUO Yu, XU Shukai, et al. VSC-HVDC transmission technology: application, advancement and expectation[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 7-13(in Chinese).
- [3] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19(in Chinese).
- [4] PEREZ M A, BERNET S, RODRIGUEZ J, et al. Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 4-17.
- [5] 余占清, 曾嵘, 屈鲁, 等. 混合式直流断路器的发展现状及展望[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2617-2626.
YU Zhanqing, ZENG Rong, QU Lu, et al. Development status and prospect of hybrid DC circuit breaker[J]. High

- Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2617-2626(in Chinese).
- [6] 朱童, 余占清, 曾嵘, 等. 全固态直流断路器在低压直流配电系统中的应用[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 50-56.
ZHU Tong, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Application of all-solid-state circuit breaker to low-voltage DC distribution system[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 50-56(in Chinese).
- [7] 赵彪, 安峰, 宋强, 等. 双有源桥式直流变压器发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 288-298.
ZHAO Biao, AN Feng, SONG Qiang, et al. Development and application of DC transformer based on dual-active-bridge[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 288-298(in Chinese).
- [8] GLEIBNER M, BAKRAN M, HUSSEIN K. Influence of the power semiconductor packaging on the failure characteristic for safety-critical applications[C]//International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Europe). 2017: 1-8.
- [9] KAUFMANN S, LANG T, CHOKHAWALA R. Innovative press pack modules for high power IGBTs[C]//Proceedings of the 13th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. Osaka, Japan: IEEE, 2001: 59-62.
- [10] KON H, NAKAYAMA K, YANAGISAWA S, et al. The 4500V-750A planar gate press pack IEGT[C]//Proceedings of the 10th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. Kyoto, Japan: IEEE, 1998: 81-84.
- [11] STIASNY T, VASILEIOS K, SETZ T, 等. IGCT——更高功率处理能力的正确选择[J]. 洪鹏, 王浩, 译. 大功率变流技术, 2015(6): 1-8.
STIASNY T, VASILEIOS K, SETZ T, et al. Where higher power handling capability is required-IGCT is the right choice[J]. HONG Peng, WANG Hao, Trans. High Power Converter Technology, 2015(6): 1-8(in Chinese).
- [12] 曾嵘, 赵彪, 余占清, 等. IGCT 在直流电网中的应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4307-4317.
ZENG Rong, ZHAO Biao, YU Zhanqing, et al. Development and prospect of IGCT power device in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4307-4317(in Chinese).
- [13] ABB. StakPak IGBT module 5SMA 3000L450300 [EB/OL]. (2018-10)[2022-03-27]. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=5SYA1469&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [14] TOSHIBA. Press pack IEGT ST3000GXH31A[EB/OL]. (2020-03-27)[2022-03-27]. <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/product/igbts-iegts/iegt-ppi/detail.ST3000GXH31A.html>.
- [15] 曾嵘, 余占清, 赵彪, 等. IGCT 器件: 直流电网的“芯”选择[J]. 科技纵览, 2020(2): 58-61.
ZENG Rong, YU Zhanqing, ZHAO Biao, et al. IGCT device: the “core” choice of DC grid[J]. IEEE Spectrum, 2020(2): 58-61(in Chinese).
- [16] 巴利加. 功率半导体器件基础[M]. 韩郑生, 陆江, 宋李梅, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013: 510-515.
- [17] TAKEDA T, KUWAHARA M, KAMATA S, et al. 1200V trench gate NPT-IGBT (IEGT) with excellent low on-state voltage[C]//Proceedings of the 10th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. Kyoto, Japan: IEEE, 1998: 75-79.
- [18] 罗皓泽, 高洪艺, 朱春林, 等. 电动汽车 IGBT 芯片技术综述和展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5717-5729.
LUO Haoze, GAO Hongyi, ZHU Chunlin, et al. Review and prospect of IGBT chip technologies for electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5717-5729(in Chinese).
- [19] 王彩琳, 高勇, 马丽, 等. 门极换流晶闸管透明阳极的机理与特性分析[J]. 物理学报, 2005, 54(5): 2296-2301.
WANG Cailin, GAO Yong, MA Li, et al. Analysis of the mechanism and characteristic for the transparent anode in a gate commutated thyristor[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(5): 2296-2301(in Chinese).
- [20] 周文定, 亢宝位. 不断发展中的 IGBT 技术概述[J]. 电力电子技术, 2007, 41(9): 115-118.
ZHOU Wending, KANG Baowei. The summary on continuous development of IGBT technology[J]. Power Electronics, 2007, 41(9): 115-118(in Chinese).
- [21] WEI Tianyu, SONG Qiang, LI Jianguo, et al. Experimental evaluation of IGCT converters with reduced di/dt limiting inductance[C]//The 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). San Antonio, TX, USA: IEEE, 2018: 1710-1716.
- [22] 孔晓李. 高压功率器件结终端技术分析与新结构研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
KONG Xiaoli. Research on the technology and new structure of terminal in the high voltage power devices[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016(in Chinese).
- [23] 王亚飞, 戴小平, 高军, 等. 大功率晶闸管芯片终端钝

- 化技术[J]. 大功率变流技术, 2017(6): 34-37.
- WANG Yafei, DAI Xiaoping, GAO Jun, et al. Passivation technology for high power thyristor chip terminal[J]. High Power Converter Technology, 2017(6): 34-37(in Chinese).
- [24] 张斌. 高压 IGBT 的设计与实现及功率器件可靠性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- ZHANG Bin. Research of high-voltage IGBT and reliability study of power devices[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013(in Chinese).
- [25] 陶崇勃, 王彩琳, 刘鹏. 8.5kV 晶闸管的设计与工艺研究[J]. 电力电子技术, 2014, 48(5): 27-28, 56.
- TAO Chongbo, WANG Cailin, LIU Peng. Design and process research of 8.5kV thyristor[J]. Power Electronics, 2014, 48(5): 27-28, 56(in Chinese).
- [26] 张明. IGCT 器件制造中的离子注入扩散技术[J]. 变流技术与电力牵引, 2006(5): 23-25, 45.
- ZHANG Ming. Ion implantation technique in the IGCT's process[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2006(5): 23-25, 45(in Chinese).
- [27] 童亦斌, 张婵, 谢路耀, 等. 4000A/4500V 系列 IGCT 器件驱动电路[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 110-115.
- TONG Yibin, ZHANG Chan, XIE Luyao, et al. Drive technology for 4000A/4500V series IGCT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 110-115(in Chinese).
- [28] RAHIMO M, KOPTA A, EICHER S, et al. A study of switching-self-clamping-mode "SSCM" as an over-voltage protection feature in high voltage IGBTs[C]// Proceedings of the 17th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, 2005. Santa Barbara, CA, USA: IEEE, 2005: 67-70.
- [29] 张红卫, 王富珍, 高勇, 等. 栅极电阻对 IGBT du/dt 和 di/dt 的影响分析[J]. 电力电子技术, 2012, 46(12): 52-54.
- ZHANG Hongwei, WANG Fuzhen, GAO Yong, et al. Analysis of the effects of IGBT gate resistance on du/dt and di/dt [J]. Power Electronics, 2012, 46(12): 52-54(in Chinese).
- [30] WIKSTROM T, STIASNY T, RAHIMO M, et al. The corrugated P-base IGCT-a new benchmark for large area SQA scaling[C]// Proceedings of the 19th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's. Jeju, Korea (South): IEEE, 2007: 29-32.
- [31] LYU Gang, ZHUANG Chijie, LIU Jiapeng, et al. Optimization for cell arrangement design of gate-commutated thyristors based on whole wafer model and tabu search[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(11): 4938-4946.
- [32] LOPHITIS N, ANTONIOU M, UDREA F, et al. Gate commutated thyristor with voltage independent maximum controllable current[J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34(8): 954-956.
- [33] 邓二平. 压接型 IGBT 器件内部电-热-力多物理场耦合模型研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.
- DENG Erping. Modelling the electro-thermo-mechanical multi-physics coupling model for press pack IGBTs[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2018(in Chinese).
- [34] WANG Heng, PRZYBILLA J, ZHANG Hao, et al. The new high reliable press pack IGBT for modular multilevel converter in VSC-HVDC applications[C]//2020 4th International Conference on HVDC (HVDC). Xi'an: IEEE, 2020: 14-19.
- [35] 唐新灵, 崔翔, 赵志斌, 等. 压接式 IGBT 器件内部并联支路瞬态电流均衡特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 233-243.
- TANG Xinling, CUI Xiang, ZHAO Zhibin, et al. Analysis of transient current distribution characteristics of parallel chips in press pack IGBT[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 233-243(in Chinese).
- [36] 曾文彬, 颜骥, 任亚东, 等. IGCT 晶片的封装结构设计[J]. 大功率变流技术, 2015(6): 20-24.
- ZENG Wenbin, YAN Ji, REN Yadong, et al. Package structure design of IGCT wafer[J]. High Power Converter Technology, 2015(6): 20-24(in Chinese).
- [37] ROSE P, SILBER D, PORST A, et al. Investigations on the stability of dynamic avalanche in IGBTs[C]// Proceedings of the 14th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. Santa Fe, NM, USA: IEEE, 2002: 165-168.
- [38] CHEN Zhengyu, YU Zhanqing, LIU Xuan, et al. Stray impedance measurement and improvement of high-power IGCT gate driver units[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6639-6647.
- [39] CHEN Zhengyu, YU Zhanqing, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and experiments for IGBT, IEGT, and IGCT in hybrid DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 2883-2892.
- [40] ABB. IGCT 4.5kV-Next generation 3[EB/OL]. (2021-04-27)[2022-03-27]. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107992A1403&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [41] LYU Gang, YU Zhanqing, ZHOU Wenpeng, et al. 6-in

- dual-gate ring commutated thyristor for DC circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(3): 1444-1449.
- [42] CHEN Zhengyu, YU Zhanqing, ZHAO Biao, et al. An advanced 4-in integrated emitter turn-off thyristor with ultralow commutation impedance to achieve 8kA turn-off capability : comprehensive analysis , design , and experiments[J] . IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(10): 9444-9454.
- [43] ABB . StakPak BIGT module 5SJA 3000L520300 [EB/OL]. (2018-11)[2022-03-27]. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=5SYA1467&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [44] ABB. Asymmetric integrated gate commutated thyristor 5SHY 42L6500[EB/OL]. (2012-12)[2022-03-27]. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=5SYA1245-03&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [45] ABB. Asymmetric integrated gate commutated thyristor 5SHY 65L4521[EB/OL]. (2021-05-11)[2022-03-27]. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=5SYA1261&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [46] KOTANI R, NITTA T, TSUKAMOTO N, et al. 4.5kV rupture resistant press pack IEGT[C]//International Exhibition and Conference for Power Electronics , Intelligent Motion , Renewable Energy and Energy Management. Nürnberg, 2018: 1-4.
- [47] ZHOU Wenpeng, ZHAO Biao, LIU Jiapeng, et al. Comprehensive analysis , design , and experiment of shoot-through faults in MMC based on IGCT for VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 6241-6250.
- [48] LIU Jiapeng, ZHAO Biao, CHEN Yongmin, et al. A novel controlled punch-through IGCT for modular multilevel converter with overvoltage bypass function[J]. IEEE Transactions on Power Electronics , 2021 , 36(7) : 8280-8290.
- [49] ZHOU Wenpeng, ZHAO Biao, LIU Jiapeng, et al. Systematic Analysis and Characterization of Extreme Failure for IGCT in MMC-HVDC system Part I: Device Structure, Explosion Characteristics and Optimization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(7): 8076-8086.
- [50] ZHANG Xiyang, CAO Guohong, ZENG Wwnbin. Research on application technology of sacrificial bypass thyristor suitable for VSC-HVDC system[C]//The 4th International Conference on HVDC (HVDC). Xi'an: IEEE, 2020: 26-30.
- [51] WIKSTRÖM T, ØDEGÅRD B, BAUMANN R. An 8.5kV sacrificial bypass thyristor with unprecedented rupture resilience[C]//Proceedings of the 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Shanghai: IEEE, 2019: 491-494.
- [52] SUNDARAMOORTHY V K, BIANDA E, KNAPP G, et al. A novel method to protect IGBT module from explosion during short-circuit in traction converters[C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2015: 2734-2741.
- [53] WANG Zhen, LI Han, WAN Chaoqun, et al. Research on the current flow mechanism of press-pack IGBT under short circuit condition in VSC-HVDC system[C]//2020 4th International Conference on HVDC (HVDC). Xi'an: IEEE, 2020: 906-910.
- [54] 康升扬. 压接式 IGBT 的电热特性与失效短路分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- KANG Shengyang . Analysis of electrothermal characteristics and short circuit failure of press-pack IGBT[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018(in Chinese).
- [55] GUNTURI S, SCHNEIDER D. On the operation of a press pack IGBT module under short circuit conditions[J] . IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2006, 29(3): 433-440.
- [56] ZHOU Wenpeng, YU Zhanqing, CHEN Zhengyu, et al. Systematic analysis and characterization of extreme failure for IGCT in MMC-HVDC system Part II: failure mechanism and short circuit characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics , 2022 , 37(5) : 5562-5573.
- [57] STIASNY T, QUITTARD O, WALTISBERG C, et al. Reliability evaluation of IGCT from accelerated testing, quality monitoring and field return analysis[J] . Microelectronics Reliability, 2018, 88-90: 510-513.
- [58] TSYPLAKOV E, CHEN Makan, STIASNY T, et al. Reliability evaluation of IGCT based on demanding long-term application[C]//International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Shanghai, 2019: 1-5.
- [59] STEIMER P, APELDOORN O, CARROLL E, et al. IGCT technology baseline and future opportunities [C]//2001 IEEE/PES Transmission and Distribution

- Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2001: 1182-1187.
- [60] LADOUX P, SERBIA N, CARROLL E I. On the potential of IGCTs in HVDC[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(3): 780-793.
- [61] 汤广福, 王高勇, 贺之渊, 等. 张北 500kV 直流电网关键技术与设备研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2097-2106.
TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106(in Chinese).
- [62] RAO Hong, ZHOU Yuebin, XU Shukai, et al. Key technologies of ultra-high voltage hybrid LCC-VSC MTDC systems[J]. Csee Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(3): 365-373.
- [63] 张翔宇, 余占清, 黄瑜珑, 等. 500kV 耦合负压换流型混合式直流断路器原理与研制[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(4): 413-422.
ZHANG Xiangyu, YU Zhanqing, HUANG Yulong, et al. Principle and development of 500kV hybrid DC circuit breaker based on coupled negative voltage commutation [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 413-422(in Chinese).
- [64] 刘晨阳, 王青龙, 柴卫强, 等. 应用于张北四端柔直工程 $\pm 535\text{kV}$ 混合式直流断路器样机研制及试验研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3638-3646.
LIU Chenyang, WANG Qinglong, CHAI Weiqiang, et al. Development and experimental research of $\pm 535\text{kV}$ hybrid DC circuit breaker prototype applied in Zhangbei four-terminal VSC-HVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3638-3646(in Chinese).
- [65] 石巍, 曹冬明, 杨兵, 等. 500kV 整流型混合式高压直流断路器[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 102-107.
SHI Wei, CAO Dongming, YANG Bing, et al. 500kV commutation-based hybrid HVDC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 102-107(in Chinese).
- [66] 许彬, 高冲, 张静. 应用于海上风电接入的 VSC-HVDC 系统主网侧交流故障穿越的新型直流耗能装置拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 88-97.
XU Bin, GAO Chong, ZHANG Jing. A novel DC chopper topology for grid side fault ride through in VSC-HVDC based offshore wind power connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 88-97(in Chinese).
- [67] 姚宏洋, 谢晔源, 方太勋, 等. 子模块可控放电集中式直流耗能装置及其控制[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2896-2904.
YAO Hongyang, XIE Yeyuan, FANG Taixun, et al. Concentrated DC energy braking device with discharge controllable sub-module topology and its control[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2896-2904(in Chinese).
- [68] 孙坚, 王君艳. ABB ACS6000 传动系统在热轧线的应用[J]. 电气自动化, 2012, 34(3): 10-11, 17.
SUN Jian, WANG Junyan. Application of ABB ACS6000 driver system in hot-rolling line[J]. Electric Drive & Automatic Control, 2012, 34(3): 10-11, 17(in Chinese).
- [69] 蔡旭, 陈根, 周党生, 等. 海上风电变流器研究现状与展望[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 101-115.
CAI Xu, CHEN Gen, ZHOU Dangsheng, et al. Review and prospect on key technologies for offshore wind power converters[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 101-115(in Chinese).
- [70] 刘文华, 宋强, 滕乐天, 等. 基于集成门极换向晶闸管与链式逆变器的 $\pm 50\text{Mvar}$ 静止同步补偿器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 55-60.
LIU Wenhua, SONG Qiang, TENG Letian, et al. $\pm 50\text{Mvar}$ STATCOM based on chain circuit converter employing IGCTs[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15): 55-60(in Chinese).
- [71] WEISS D, VASILADIOTIS M, BANCEANU C, et al. IGCT based modular multilevel converter for an AC-AC rail power supply[C]//International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nürnberg, Deutschland, 2017: 1-8.
- [72] ZENG Rong, ZHAO Biao, WEI Tianyu, et al. Integrated gate commutated thyristor-based modular multilevel converters: a promising solution for high-voltage DC applications[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2019, 13(2): 4-16.
- [73] AGOSTINI F, VEMULAPATI U, TORRESIN D, et al. 1MW bi-directional DC solid state circuit breaker based on air cooled reverse blocking-IGCT[C]//2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS). Old Town Alexandria, VA, USA: IEEE, 2015: 287-292.
- [74] 陈政宇, 余占清, 吕纲, 等. 基于 IGCT 串联的 10kV 直流混合断路器研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 317-326, 587.
CHEN Zhengyu, YU Zhanqing, LÜ Gang, et al. Researches on 10kV DC hybrid circuit breaker based on

- IGCT series[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 317-326, 587(in Chinese).
- [75] QU Lu, YU Zhanqing, HUANG Songbo, et al. Design and analysis of a 375V/5kA solid state DC circuit breaker based on IGCT[C]//2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (Peac). Shenzhen: IEEE, 2018: 1-5.
- [76] 思源电气. 思源电气 500kV 直流断路器在张北柔直电网投运一百天[EB/OL]. (2020-10-14)[2022-03-27]. http://www.sieyuan.com/index.aspx?cat_code=gsxw&article_id=3544.
- [77] SONG Qiang, MENG Jingwei, ZHAO Biao, et al. Modular multilevel converter using IGCT-based cross-connected modules for medium voltage DC grids[C]//2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2019: 1457-1462.
- [78] LIU Jiapeng, YU Zhanqing, ZHOU Wenpeng, et al. Ultra-low on-state voltage IGCT for solid-state DC circuit breaker with single-switching attribute[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 3292-3303.
- [79] XU Chaoqun, ZHANG Xiangyu, YU Zhanqing, et al. A novel DC chopper with mov-based modular solid-state switch and concentrated dissipation resistor for $\pm 400\text{kV}/1100\text{MW}$ offshore wind VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 4483-4488.
- [80] 刘国友, 窦泽春, 罗海辉, 等. 高功率密度 3600A/4500V 压接型 IGBT 研制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4855-4862.
- LIU Guoyou, DOU Zechun, LUO Haihui, et al. Development of high power density 3600A/4500V press-pack IGBT[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4855-4862(in Chinese).
- [81] VEMULAPATI U, RAHIMO M, ARNOLD M, et al. Recent advancements in IGCT technologies for high power electronics applications[C]//2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe). Geneva, Switzerland: IEEE, 2015: 1-10.
- [82] WIKSTRÖM T, ARNOLD M, STIASNY T, et al. The 150mm RC-IGCT: a device for the highest power requirements[C]//Proceedings of the 2014 IEEE 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD). Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2014: 91-94.



周文鹏

在线出版日期: 2022-01-10。

收稿日期: 2021-10-12。

作者简介:

周文鹏(1995), 男, 博士研究生, 研究方向为大功率电力电子器件技术、柔性直流输电系统及设备, 18511829845@163.com;

*通信作者: 曾嵘(1971), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为直流电网关键装备与电力电子器件、交直流系统电磁暂态及其防护等, zengrong@tsinghua.edu.cn;

赵彪(1987), 男, 博士, 副教授, 研究方向为柔性直流输配电和直流变压器技术等;

陈政宇(1992), 男, 博士后, 研究方向为大功率电力电子器件技术等;

刘佳鹏(1994), 男, 博士后, 研究方向为大功率电力电子器件技术等;

白睿航(1998), 男, 博士研究生, 研究方向为柔性直流输电系统及设备、新型功率半导体器件;

吴锦鹏(1987), 男, 博士, 副教授, 研究方向为能源和电气材料、大功率电力电子技术、X射线光谱学等;

余占清(1981), 男, 博士, 副教授, 研究方向为柔性直流输配电技术, 电力系统电磁环境等。

(责任编辑 吕鲜艳)

Comparative Analysis of Large-capacity Fully-controlled Press-pack IGBT and IGCT: Principle, Structure, Characteristics and Application

ZHOU Wenpeng, ZENG Rong*, ZHAO Biao, CHEN Zhengyu, LIU Jiapeng,
 BAI Ruihang, WU Jinpeng, YU Zhanqing
 (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University)

KEY WORDS: press-pack device; insulated gate bipolar transistor (IGBT); injection enhanced gate transistor (IEGT); integrated gate commutated thyristor (IGCT); DC power grids; large-capacity power electronics

Large-capacity fully-controlled press-pack devices are the core components of large-capacity power electronic equipment for power conversion, mainly including thyristor-like devices such as integrated gate commutated thyristor (IGCT), and transistor-like devices such as insulated gate bipolar transistor (IGBT) and injection enhanced gate transistor (IEGT). Fig. 1 compares the three kinds of commercial large-capacity fully-controlled press-pack devices' pictures.

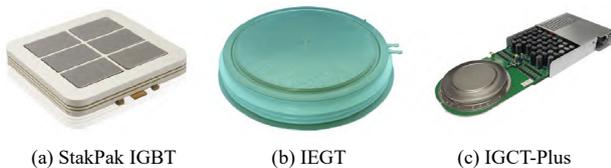


Fig. 1 Comparison of commercial large-capacity fully-controlled press-pack devices' pictures

With the development of DC power grid technology and engineering, the application of large-capacity fully-controlled press-pack devices has become more and more extensive. However, existing literatures lack the systematic comparison of these large-capacity fully-controlled press-pack devices on the chip structure, the working principle and packaging form, as well as the working characteristics and application differences in different scenes.

This paper firstly introduces and compares chip structures and manufacturing processes of IGCT and IGBT (including IEGT). Then, the working principles and packaging structures of IGCT and IGBT (including IEGT) are analyzed and compared. After that, the working characteristics of different fully-controlled press-pack devices are analyzed systematically from nine aspects including working frequency, turn-off capability, dynamic tolerance, device capacity, operating loss, gate driver power, housing package explosion proof, short

circuit failure mode (SCFM), and device reliability. Finally, the application status and application forecast of fully-controlled press-pack devices are summarized and prospected.

IGBT and IGCT's structures and characteristics are summarized in Table 1. In general, for the low-frequency and large-capacity applications such as the modular multilevel converter (MMC), IGCT's defects like low operating frequency and high gate driver power are avoided. Meanwhile, its advantages such as low loss, low cost, large capacity, and excellent safety can be fully utilized, which shows IGCT's broad application prospects.

Table 1 IGBT and IGCT's structures and characteristics

Device type	IGBT	IGCT
Chip structure	Small-size; complex cell	Whole-wafer; simple cell
Package structure	Complicated multi-chip paralleled package	Simple and reliable whole-wafer package
Production cost	High	Low
Working frequency	High; above kilohertz	Low; hundreds of hertz
Turn-off capability	Strong	ordinary
Dynamic tolerance	di/dt can be controlled by the gate driver; dv/dt is high under black start	di/dt is controlled by the loop inductance; dv/dt is high under black start
Operating loss	High turn-on and conduction loss; high turn-off loss for the type with low-frequency optimization	Low turn-on and conduction loss; high turn-off loss
Gate driver power	Low	High; reduced under low-frequency scenes
Device capacity	Difficult for the capacity increase (especially the conducting current)	Less difficulty in the capacity increase
Safety	Weak explosion proof and unstable short circuit failure mode (SCFM)	Strong explosion proof and stable SCFM